doi:10.13866/j.azr.2018.05.09

土壤调理剂改良风沙土的试验研究①

喜银巧[1,2]， 赵 英[1]， 董正武[1]， 李生宇[1]
（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：为评估多种土壤调理剂（羧甲基纤维素钠、磷石膏和生物炭）对风沙土理化性质及植物生长的影响，以不同比例混合的改良剂和风沙土进行棉花盆栽实验，测定分析土壤理化性质及植物生长状况的变化，并运用主成分分析（PCA）和加权求和相结合的方法，构建改良效果评价体系，从而筛选得到最佳调理剂及其配比。结果表明：与对照相比，风沙土容重和 pH 减小，孔隙度、有机质、全氮、全磷、速效磷和速效钾增大，全钾含量变化不大；同时棉花株高、基茎和生物量均大幅增加。由综合评价方程计算得出，高灌水量下改良处理综合得分明显高于低灌水量下，高灌水量下生物炭处理综合得分最高，其次为磷石膏处理，羧甲基纤维素钠处理得分最低，综合得分排序为：CG3 > CG2 > CG1 > BG3 > BG2 > AG3 > BG1 > AG2 > AG1，其中施加生物炭 45 g·kg^{-1}处理的改良效果最好，得分为 4.69。

关键词：风沙土；土壤调理剂；主成分分析；盆栽实验；棉花

中国是世界上荒漠化最严重的国家之一[1]，土地荒漠化是当前我国西北地区亟待解决的核心生态环境难题[2-3]。随着中国西部大开发战略的持续推进及近年来“一带一路”倡议的实施，荒漠化已经严重阻碍了西部地区的经济发展以及民众生存条件和生活质量的提升[4]。生物固沙是最根本最有效的固沙措施[5-6]，但风沙土结构松散、养分含量少[7]、水分缺失[8]、土壤质量差[9]，无法满足植物生长的需求，导致生物固沙需要耗费大量的人力和财力。若在风沙土区域添加土壤调理剂，使风沙土环境更有利于植物生长，将会极大提高生物固沙效率，减少固沙成本，是实现沙漠地区生态恢复及经济快速发展的最佳措施。因此，研究土壤调理剂对风沙土性质和植物生长的影响，对于促进荒漠区土壤改良、植被恢复与重建及提高沙漠区域生态系统稳定性具有重要意义。

研究表明土壤调理剂（如生物炭[10-11]、污泥[12-13]、腐植酸[14-15]、城市固废[16]、无机矿物[17-19]及高分子聚合物[20-21]等）能有效改善风沙土性质及促进植物生长。武梦娟等[10]认为生物炭能提高沙土有机质及养分含量，同时能促进绿豆幼苗的生长；杨桐桐等[12]认为污泥堆肥产品可以提高土壤电导率及土壤肥力水平，还能促进高羊茅的生长；另外，土壤调理剂对土壤水分贮藏和土壤酶活性及玉米产量有积极影响[9]；而煤基固废与粪便混合物能明显改善土壤结构、增加土壤肥力，并促进能源草的生长[22]。目前的研究主要讨论土壤性质及植物生长对单一土壤调理剂的响应，而采用数学计算的方法构建多种土壤调理剂改良效果评价体系的研究较为缺乏。因此，本文采用盆栽试验与室内分析相结合的方法，对比分析目前采用较多的 3 种调理剂对风沙土理化性质及其棉花生长的影响，采用主成分分析与加权求和计算相结合的方法，建立 3 种调理剂改良效果的综合评价方程，筛选出改良效果最佳的调理剂以及最佳的配比用量，以期将土壤调理剂应用于沙漠边缘绿洲地区的风沙土改良及生态恢复提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

沙土样品取自新疆库木塔格沙漠边缘（90°24′77″E，42°85′52″N），用四分法随机采集样地 0～40 cm 土样，去除杂质后放阴凉处自然风干，用于盆栽试验，并取部分土样测定土壤初始理化性质。

① **收稿日期：**2017-12-18； **修订日期：**2018-04-04
基金项目：国家千人计划新疆项目（Y472241001）资助
作者简介：喜银巧（1992-），女，硕士研究生，研究方向为土壤改良及荒漠化防治研究. E-mail：xiyinqiaonk@163.com
通讯作者：赵英. E-mail：yzhaosoils@gmail.com

表 1 供试土样及改良剂的基本性质

Tab. 1 Properties of the test samples and soil conditioner

试样	容重 /(g·cm⁻³)	孔隙度 /%	pH	有机质 /(g·kg⁻¹)	全氮 /(g·kg⁻¹)	全磷 /(g·kg⁻¹)	全钾 /(g·kg⁻¹)	速效磷 /(mg·kg⁻¹)	速效钾 /(mg·kg⁻¹)
沙土	1.53	42.23	9.03	1.31	0.03	0.42	8.49	3.62	100.38
CMC	–	–	8.3	–	–	0.69	1.31	–	–
磷石膏	–	–	3.7	0.005	0.007	2.56	5.08	–	–
生物炭	–	–	9.2	586.5	1.33	1.31	13.00	–	–

同时利用 100 cm^3 的环刀采集原状土，测定风沙土初始容重和孔隙度。

本实验选用的磷石膏、生物炭、羧甲基纤维素钠(CMC)和硫酸钾复合肥分别购于长沙兆宇建材公司、泰然有机肥有限公司、天津润圣纤维素科技有限公司和湖北新洋丰肥业股份有限公司。供试土样及改良剂基本性质见表 1。供试棉花为新陆早 50 号，是新疆主要经济作物之一。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2017 年 5 月至 2017 年 10 月在新疆乌鲁木齐市中国科学院新疆生态与地理研究所进行。乌鲁木齐属中温带大陆性干旱气候，夏季昼长夜短，温差大，年平均气温 9.2 ℃，7 月平均最高气温约 26 ℃，1 月平均最低气温约 –14 ℃。

试验设计 2 个灌水梯度(10% 和 20%)，3 种土壤调理剂，分别为：羧甲基纤维素钠(CMC)(0.5、2.0 $g\cdot kg^{-1}$和 3.5 $g\cdot kg^{-1}$)、磷石膏(5、15 $g\cdot kg^{-1}$和 25 $g\cdot kg^{-1}$)和生物炭(15、30 $g\cdot kg^{-1}$和 45 $g\cdot kg^{-1}$)；并设置 2 个对照(1 个空白对照和 1 个施肥对照)，共计 22 个处理，每个处理 3 个重复。每个处理施加 8 $g\cdot kg^{-1}$ 氮磷钾复合肥料，具体设计见表 2。

表 2 试验处理

Tab. 2 Test treatments

土壤调理剂种类	添加量 /(g·kg⁻¹)	复合肥添加量 /(g·kg⁻¹)	处理	
			低水	高水
CMC	0.5	8	AD1	AG1
	2	8	AD2	AG2
	3.5	8	AD3	AG3
磷石膏	5	8	BD1	BG1
	15	8	BD2	BG2
	25	8	BD3	BG3
生物炭	15	8	CD1	CG1
	30	8	CD2	CG2
	45	8	CD3	CG3
对照	0	0	CKD	CKG
	0	8	FD	FG

每盆称干土 17.5 kg，与土壤调理剂和复合肥充分混合装入花盆(高：35 cm，底部直径：28 cm，口部直径：30 cm)，盆底铺一层细纱布，防止风沙土漏出。于 2017 年 5 月 6 日播种棉籽，每盆播种 10 颗，2～3 片真叶后每盆留长势良好并均匀的幼苗 3 颗，管理方式与大田一致。按照设定的灌水量 3 d 浇水 1 次，并每半个月用烘干法测定风沙土实际含水量来校正浇水量，雨天用透明塑料棚遮盖实验区域，保证实验期间盆栽处理不被雨淋。

1.3 指标测定

将采集到的环刀土样(体积为 100 cm^3)烘干称重，计算得出容重和孔隙度。待种植结束后均匀混合花盆中的风沙土，随机取足量风沙土，自然风干后过孔径为 2 mm 筛，用于土壤理化性质的测定。将风沙土与水按 1:5 的比例混合，浸提 15 min 后用雷磁 pH 计测定风沙土酸碱度。土壤有机质及养分含量依据文献[23]中的方法，有机质采用硫酸 – 重铬酸钾外加热法测定；全氮使用 K1100 全自动凯氏定氮仪测定；全磷采用氢氧化钠熔融 – 钼锑抗比色法测定；全钾采用氢氧化钠熔融 – 火焰光度法测定；速效磷采用 0.5 $mol\cdot L^{-1}$ $NaHCO_3$ 法测定；速效钾采用 NH_4OAc 浸提 – 火焰光度法测定。

每盆选定一棵长势良好、均匀的植株在 7—9 月的月初和月中用游标卡尺测定基茎、用卷尺测定株高。种植结束后将每个处理的 3 颗棉花植株所有地上部分顺着土壤表面剪下，抖落土壤后放入塑料袋中，然后将棉花根系从花盆中倒出，冲洗风干后放入自封带中。将采集到的每颗棉花地上及地下部分混合，放入烘箱中在 65 °C 下烘 24 h 直至恒定重量，称重即为棉花生物量。

1.4 数据处理

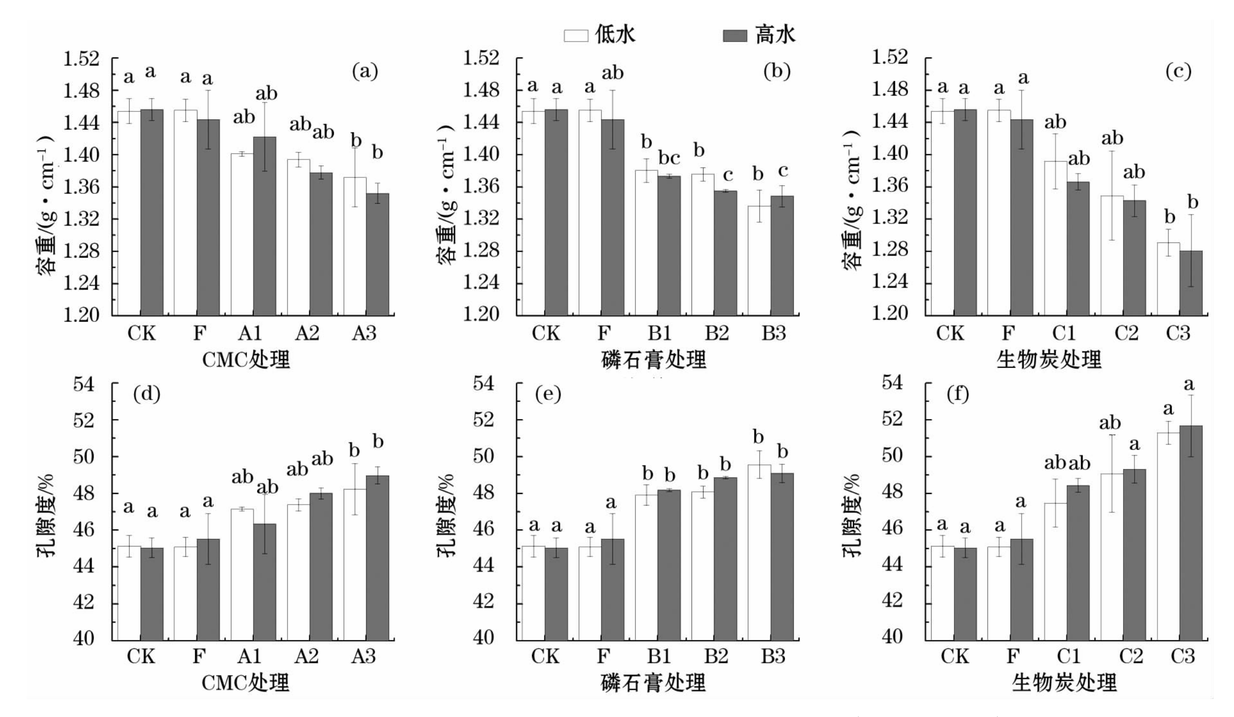
利用 Excel 软件对数据进行整理和计算，利用 IBM SPSS statistics 19.0 进行统计分析。采用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较分析，用 Pearson 相关分析法进行各指标

间相关分析,使用 SPSS 19.0 进行主成分分析,利用 Origin Pro 2016 软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 不同改良处理下沙土理化指标的变化

2.1.1 土壤容重和孔隙度的变化 土壤容重和孔隙度是评判土壤结构状况的重要指标[24],风沙土存在容重过大而孔隙度较小的特征,不利于土壤中水、气、肥料及热量等元素的交换调节。由图 1 可知,在风沙土中添加羧甲基纤维素钠、磷石膏和生物炭后,对容重和孔隙度有显著影响。在相同灌水量条件下,无论添加何种改良剂,容重均随着添加量的增加而逐渐减少,孔隙度均随着添加量的增加而逐渐增大。但空白对照与只施加复合肥对照相比差别不大,说明复合肥的施加对土壤容重和孔隙度影响不大。此外,在相同土壤调理剂添加量条件下,不同灌水量处理对土壤容重和孔隙度影响不大。对风沙土容重和孔隙度改善最明显的是生物炭处理,与对照



注:CK 为空白对照;F 为施肥对照;A1、A2 和 A3 为添加羧甲基纤维素钠 0.5、2.0 $g\cdot kg^{-1}$ 和 3.5 $g\cdot kg^{-1}$ 的处理;B1、B2 和 B3 为添加磷石膏 5、15 $g\cdot kg^{-1}$ 和 25 $g\cdot kg^{-1}$ 的处理;C1、C2 和 C3 为添加生物炭 15、30 $g\cdot kg^{-1}$ 和 45 $g\cdot kg^{-1}$ 的处理。同一灌水量下,不同小写字母代表不同土壤调理剂添加量处理间有显著性差异($P<0.05$)。下同。

图 1 不同土壤调理剂处理下沙土容重和孔隙度的变化

Fig. 1 Change of bulk density and porosity of soil samples under different soil conditioner treatments

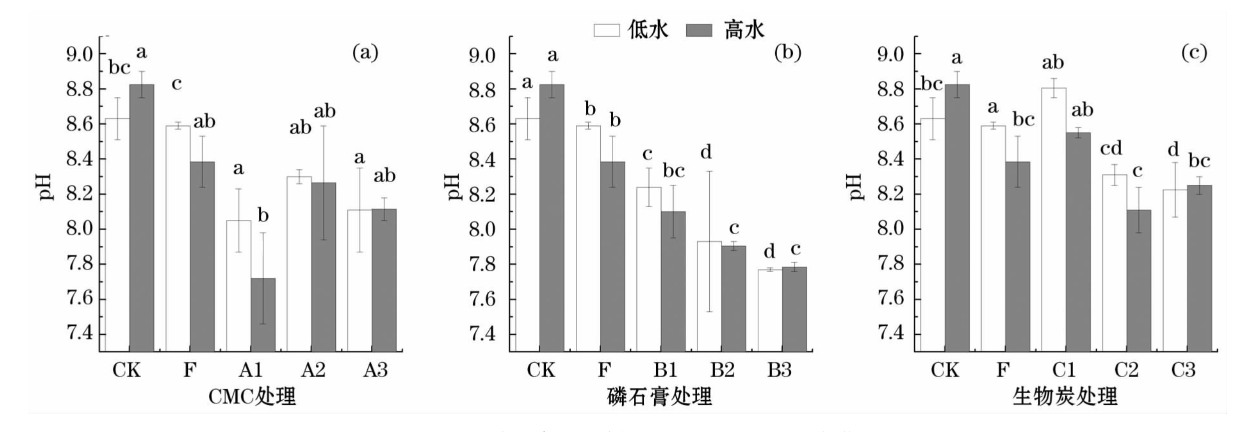


图 2 不同土壤调理剂处理下沙土 pH 的变化

Fig. 2 Change of pH values of soil samples under different soil conditioner treatments

表 3 不同土壤调理剂处理下沙土有机质和养分含量的变化

Tab. 3 Change of soil organic matter and nutrient contents under different soil conditioner treatments

灌水量	处理	有机质	全氮	全磷	全钾	速效磷	速效钾
		/(g·kg⁻¹)				/(mg·kg⁻¹)	
低水(10%)	CKD	1.74 ±0.18	0.087 ±0.004	0.516 ±0.015	8.970 ±0.228	18.25 ±1.43	155.840 ±2.28
	FD	1.62 ±0.19	0.080 ±0.004	0.606 ±0.04	8.466 ±0.17	17.63 ±0.51	150.380 ±0.76
	AD1	1.65 ±0.32	0.105 ±0.005	0.756 ±0.03	8.521 ±0.07	23.52 ±0.57	187.580 ±2.49
	AD2	1.58 ±0.19	0.093 ±0.006	0.699 ±0.01	8.067 ±0.113	24.94 ±1.86	196.760 ±1.97
	AD3	1.87 ±0.61	0.108 ±0.005	0.691 ±0.04	8.343 ±0.144	37.34 ±1.09	209.110 ±1.07
	BD1	1.70 ±0.48	0.110 ±0.002	0.883 ±0.03	8.386 ±0.019	18.05 ±0.19	179.730 ±1.38
	BD2	2.16 ±0.15	0.123 ±0.005	1.092 ±0.111	9.017 ±0.842	22.75 ±0.48	185.820 ±0.78
	BD3	2.27 ±0.35	0.156 ±0.006	1.457 ±0.019	8.142 ±0.164	34.79 ±0.78	188.990 ±1.83
	CD1	2.99 ±0.17	0.208 ±0.005	0.741 ±0.038	8.703 ±0.06	27.46 ±0.68	176.470 ±4.94
	CD2	5.17 ±0.19	0.233 ±0.007	0.750 ±0.019	8.782 ±0.06	31.32 ±1.87	187.460 ±1.53
	CD3	8.36 ±0.95	0.336 ±0.009	0.739 ±0.051	9.074 ±0.074	47.04 ±2.54	229.000 ±1.47
高水(20%)	CKG	1.71 ±0.18	0.088 ±0.005	0.552 ±0.025	8.615 ±0.128	18.240 ±2.14	154.03 ±0.44
	FG	1.61 ±0.19	0.081 ±0.003	0.603 ±0.032	8.665 ±0.115	21.27 ±2.38	160.950 ±0.5
	AG1	1.77 ±0.32	0.098 ±0.004	0.697 ±0.014	8.100 ±0.155	28.05 ±0.32	167.830 ±1.13
	AG2	1.74 ±0.19	0.113 ±0.007	0.722 ±0.018	8.131 ±0.142	26.88 ±0.49	170.745 ±3.19
	AG3	1.97 ±0.61	0.102 ±0.009	0.690 ±0.02	8.477 ±0.15	30.24 ±0.03	179.790 ±4.68
	BG1	1.93 ±0.48	0.118 ±0.005	0.953 ±0.066	8.146 ±0.093	29.28 ±0.55	183.120 ±3.07
	BG2	2.01 ±0.15	0.129 ±0.005	0.982 ±0.083	8.126 ±0.03	30.67 ±4.2	191.660 ±3.05
	BG3	2.37 ±0.35	0.138 ±0.007	1.189 ±0.09	8.475 ±0.15	31.10 ±1.07	198.654 ±3.4
	CG1	2.86 ±0.17	0.192 ±0.003	0.764 ±0.048	9.020 ±0.086	41.97 ±0.84	168.099 ±2.8
	CG2	6.75 ±0.19	0.265 ±0.006	0.845 ±0.046	9.098 ±0.109	68.52 ±0.34	192.840 ±1.50
	CG3	7.63 ±0.95	0.387 ±0.005	0.865 ±0.041	9.417 ±0.181	78.46 ±2.66	211.640 ±0.46

相比,容重降低了11.30%,孔隙度增加了13.76%,可能是因为生物炭有较大的比表面积和丰富的有机质含量[25],增加了沙土矿物结构与有机质结合,促进土壤团聚体的形成,从而改善风沙土紧实的土壤结构。

2.1.2 土壤pH的变化 pH对土壤养分的有效性及微生物的活性均有很大影响[12]。由图2可知,在相同灌水量条件下,在风沙土中添加羧甲基纤维素钠、磷石膏和生物炭后,土壤pH均小于对照,且均随添加量的增大而逐渐减小。空白对照与只施加复合肥对照相比,土壤pH小幅增加,在相同土壤调理剂添加量条件下,灌水量对风沙土pH的影响均为高灌水量条件下pH更小,可能是因为高灌水量对风沙土产生淋洗作用,使风沙土碱性变弱。对风沙土pH改良作用最明显的是磷石膏处理,与对照相比,风沙土pH降低9.55%,风沙土pH向更适合植物生长的范围变化,可能是因为磷石膏中含有大量的有效钙和游离酸[26],Ca^{2+}可以置换出土壤中的Na^{+},游离酸可以中和土壤碱度。生物炭虽呈碱性,但可使风沙土pH降低,也可能与CO_2的释放有关[16]。

2.1.3 土壤有机质和养分含量的变化 土壤中有机质和养分含量对于土壤肥力和养分循环有重要作用[22,27]。由表3可知,灌水量一定时,在风沙土中添加3种土壤调理剂后,与对照相比,土壤有机质及养分含量大部分有不同程度的提高,土壤肥力得以改善,其中有机质、全氮、全磷、速效磷及速效钾含量均随着土壤调理剂添加量的增加而逐渐增大,全钾含量变化不大。只施加复合肥对照与空白对照相比均能小幅提升土壤肥力。在相同调理剂添加量条件下,灌水量对风沙土有机质及养分含量影响不大。对风沙土有机质、全氮、速效磷和速效钾含量影响最大的是生物炭处理,与对照相比,增幅高达416.53%、380.50%、268.91%和52.28%,而对风沙土全磷含量影响最明显的是磷石膏处理,与对照相比,增幅高达140.54%。生物炭能显著提高风沙土有机质及养分含量主要是因为生物炭是由秸秆等有机废料高温裂解制成,其本身含有丰富的有机质及氮磷钾等土壤养分。供试磷石膏含磷量高达2.56g·kg⁻¹,因此,添加到风沙土中能大幅提高沙

表 4　不同土壤调理剂处理下棉花株高和基茎的变化

Tab. 4　Change of cotton plant height and basal stem under different soil conditioner treatments

处理	低水株高/cm	基茎/mm	处理	高水株高/cm	基茎/mm
CKD	14. 90 ±0. 700	3. 23 ±0. 06	CKG	23. 45 ±1. 150	4. 27 ±0. 036
FD	14. 3	3. 74	FG	25. 30 ±0. 100	4. 54 ±0. 175
AD1	18. 27 ±2. 477	3. 40 ±0. 288	AG1	25. 00 ±2. 905	4. 23 ±0. 560
AD2	16. 60 ±1. 249	3. 48 ±0. 126	AG2	28. 23 ±4. 817	4. 5 ±0. 124
AD3	19. 70 ±1. 747	3. 12 ±0. 219	AG3	29. 30 ±2. 087	5. 22 ±0. 274
BD1	19. 40 ±2. 751	3. 43 ±0. 236	BG1	34. 80 ±0. 800	4. 82 ±0. 053
BD2	20. 97 ±1. 796	3. 88 ±0. 448	BG2	39. 57 ±3. 432	5. 33 ±0. 171
BD3	25. 47 ±2. 122	3. 87 ±0. 081	BG3	40. 10 ±1. 969	5. 20 ±0. 259
CD1	16. 50 ±2. 041	3. 99 ±0. 078	CG1	39. 63 ±3. 188	5. 58 ±0. 112
CD2	17. 20 ±0. 980	3. 83 ±0. 365	CG2	40. 70 ±4. 278	5. 66 ±0. 542
CD3	20. 90 ±2. 676	3. 00 ±0. 24	CG3	41. 91 ±0. 982	5. 81 ±0. 073

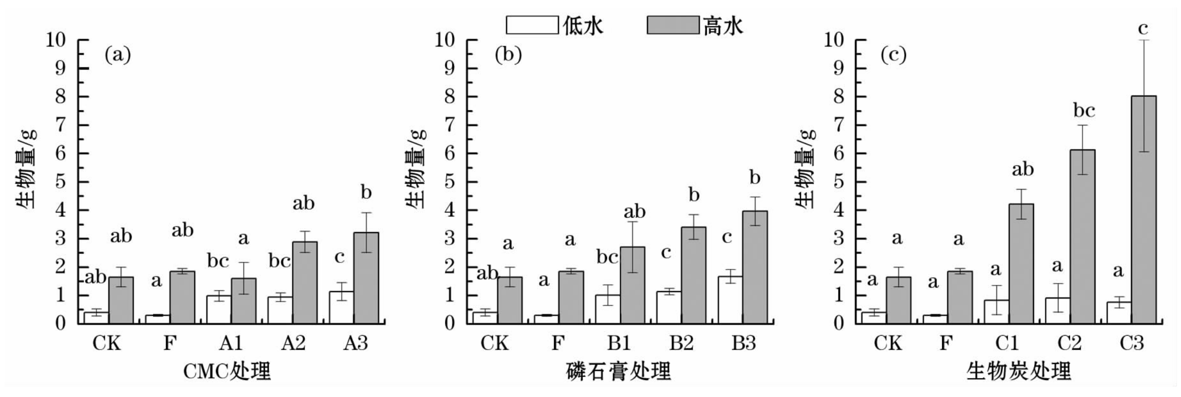


图 3　不同土壤调理剂处理下棉花生物量的变化

Fig. 3　Change of cotton biomass under different soil conditioner treatments

土的供磷潜力。

2.2　植物生长指标的变化

2.2.1　棉花株高和基茎的变化

株高和基茎可以直接反映植物的生长状况，本研究从 7 月 1 日到 9 月 15 日每半个月测量 1 次棉花株高和基茎。以 9 月 15 日测量结果为例，由表 4 可知，灌水量一定时，土壤调理剂处理的棉花株高及基茎均大于对照处理，且随着土壤调理剂添加量的增加而逐渐增大。调理剂添加量一定时，灌水量对棉花生长有明显影响，低灌水量严重抑制了植物生长。低灌水量下肥料对照与空白对照相比长势变化不大，但高灌水量的肥料对照的长势略好于空白对照，说明水分是控制棉花生长的关键因素。3 种调理剂中对棉花生长状况影响最大的是生物炭，与对照相比，株高涨幅高达 65. 65%，基茎涨幅高达 27. 97%。土壤调理剂处理后棉花株高和基茎的增加主要是因为土壤改良剂的添加，使风沙土有机质及养分含量大幅增加，植物能吸收的营养物质增多，植物长势因此变好。

2.2.2　棉花总生物量的变化

棉花生物量的干重表征了植物对有机物质的积累，能直接反映植物的生长状况[28]。由图 3 可知，在相同灌水量处理下，3 种土壤调理剂处理后棉花生物量普遍大于对照处理，且随着调理剂添加量的增大，棉花生物量基本呈逐渐增加趋势。高灌水量对大部分处理的棉花生物量都有显著促进作用($P<0.05$)。相比于空白对照，低灌水量下肥料对棉花生物量的影响较小，而高灌水量下肥料对照的棉花生物量小幅增加。对棉花生物量影响最大的是生物炭处理，与对照相比提高 334%，生物量与株高基茎的响应一致，其也与土壤中的有机质和养分含量密切相关。

2.3　建立改良效果综合评价体系

由前述可知，3 种土壤调理剂对风沙土理化性质及棉花生长均有一定程度的影响，但指标间存在差异，即对某指标而言最优的改良处理在另一指标下却改良效果较差，单一指标无法代表土壤调理剂的综合改良效果。基于此，本研究采用主成分分析与加权求和计算相结合的方法，建立改良效果综合

表 5 各改良指标相关系数矩阵

Tab. 5 Correlation coefficient matrix of the improved indexes

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
X1	1											
X2	-0.99**	1										
X3	0.44*	-0.46*	1									
X4	-0.72**	0.69**	0.003	1								
X5	-0.78**	0.76**	0.01	0.96**	1							
X6	-0.54*	0.57**	-0.67**	0.05	0.17	1						
X7	-0.29	0.28	0.35	0.69**	0.68**	-0.16	1					
X8	-0.75**	0.74**	-0.18	0.83**	0.86**	0.20	0.55**	1				
X9	-0.85**	0.82**	-0.47*	0.63**	0.63**	0.40	0.18	0.61**	1			
X10	-0.51*	0.52*	-0.35	0.30	0.37	0.40	0.16	0.63**	0.25	1		
X11	-0.32	0.34	-0.15	0.21	0.29	0.22	0.20	0.53*	-0.02	0.91**	1	
X12	-0.55**	0.57**	-0.20	0.48*	0.55**	0.25	0.38	0.81**	0.29	0.90**	0.88**	1

注：*表示 $P<0.05$；**表示 $P<0.01$。

评价方程，计算出各处理的改良效果综合得分，从而得出最优的土壤调理剂种类及配比。

2.3.1 改良效果评价指标的相关性分析 表 5 为所选取的 12 个改良效果评价指标的相关性分析，包含 2 个物理指标：容重 X1、孔隙度 X2，7 个化学指标：土壤酸碱度 X3、有机质 X4、总氮 X5、总磷 X6、总钾 X7、速效磷 X8、速效钾 X9，3 个植物指标：株高 X10、基茎 X11、生物量 X12。由表 5 可知，12 个改良指标间存在一定的相关关系，因此，可对其进行主成分分析。其中，容重与其余 11 个指标都存在较好的相关性，且大部分呈负相关，说明土壤容重是影响综合改良效果的决定性指标。

2.3.2 各主成分的特征根与方差贡献率 因各评价指标的量纲不同，需对指标进行标准化处理，其次对标准化处理后的 12 项指标进行主成分分析，表 6 是选取的各主成分的特征根与方差贡献率，当各主成分的累积贡献率大于 85% 时，基本可反映系统的变异信息。由表 6 可知，第一主成分 F1 的特征根是 2.54，解释了总变异的 53.79%；第二主成分 F2 的特征根是 1.51，解释了总变异的 18.98%；第三主成分 F3 的特征根是 1.40，解释了总变异的 16.4%；前 3 个主成分的累计贡献率达到了 89.17% >85%，因此说明前 3 个主成分已经能包含 12 个指标的大部分信息。

2.3.3 特征向量及主成分表达式 表 7 是所选取的 12 个初始指标与 3 个主成分 F1、F2、F3 的相关系数，由表 7 可知，容重、孔隙度、总氮和速效磷在第一主成分上有较高负荷，代表了土壤物理特性和养分含量状况，pH、有机质、总磷和总钾在第二主成分上有较高负荷，代表了土壤化学特性和养分含量状况，速效钾、株高、基茎、生物量在第三主成分上有较高负荷，代表了植物的生长状况。

表 6 各主成的特征根和累积贡献率

Tab. 6 Eigenvalues and accumulated contribution rates of principal components

	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%
F1	2.54	53.79	53.79
F2	1.51	18.98	72.76
F3	1.4	16.4	89.17

表 7 主成分的特征向量

Tab. 7 Eigenvectors of principal components

指标	F1	F2	F3
X1	-0.36	0.09	0.21
X2	0.36	-0.11	-0.20
X3	-0.14	0.53	0.14
X4	0.32	0.32	-0.17
X5	0.34	0.28	-0.13
X6	0.18	-0.46	-0.12
X7	0.19	0.48	0.04
X8	0.36	0.14	0.06
X9	0.29	-0.09	-0.41
X10	0.28	-0.19	0.43
X11	0.22	-0.10	0.56
X12	0.31	-0.02	0.41

特征向量表示了主成分在各个初始指标中对应的得分，因此，3 个主成分与 12 项标准化后的初始指标之间的关系可用线性组合方程来表示，各主成分函数表达式如下：

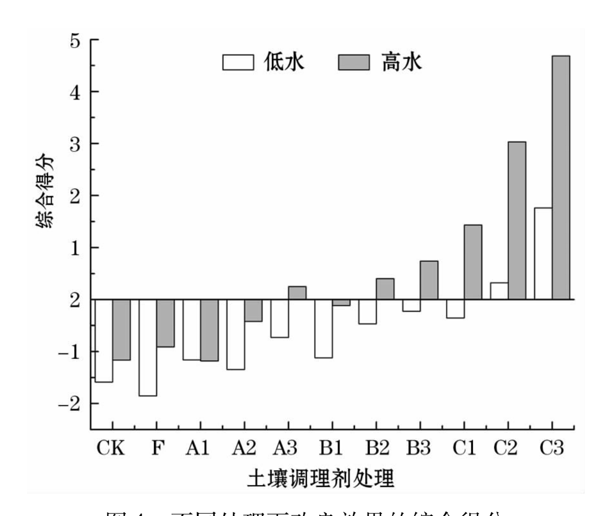


图 4　不同处理下改良效果的综合得分

Fig. 4　Comprehensive scores of different soil conditioner treatments

$$F1 = -0.36X1 + 0.36X2 - 0.14X3 + 0.32X4 + 0.34X5 + 0.18X6 + 0.19X7 + 0.36X8 + 0.29X9 + 0.28X10 + 0.22X11 + 0.31X12 \quad (1)$$

$$F2 = 0.09X1 - 0.11X2 + 0.53X3 + 0.32X4 + 0.28X5 - 0.46X6 + 0.48X7 + 0.14X8 - 0.09X9 - 0.19X10 - 0.10X11 - 0.02X12 \quad (2)$$

$$F3 = +0.21X1 - 0.20X2 + 0.14X3 - 0.17X4 - 0.13X5 - 0.12X6 + 0.04X7 + 0.06X8 - 0.41X9 + 0.43X10 + 0.56X11 + 0.41X12 \quad (3)$$

2.3.4　改良效果综合评价　通过各主成分加权求和得到的综合评价方程来建立改良效果综合评价体系，综合评价方程中的权重系数用各主成分的贡献率与累积贡献率的比值来计算，因此，改良效果综合评价方程为：

$$F = 0.603F1 + 0.213F2 + 0.184F3 \quad (4)$$

由图 4 可知，在相同土壤调理剂处理下，高灌水量下处理得分均大于低灌水量，说明高灌水量与土壤调理剂结合能达到更好的改良效果。在高灌水量条件下综合得分基本为：生物炭处理 > 磷石膏处理 > 羧甲基纤维素钠处理，且随着添加量的增大，得分普遍呈现越来越高的趋势，其中生物炭添加量为 15 $g \cdot kg^{-1}$、30 $g \cdot kg^{-1}$、45 $g \cdot kg^{-1}$的处理综合得分排名前 3，分别为 1.43、3.03 和 4.69。

3　结 论

本文以棉花为栽培植物，测定改良前后土壤及植物的 12 项指标，建立改良效果综合评价体系，对比羧甲基纤维素钠、磷石膏和生物炭 3 种土壤调理剂的综合改良效果，得到如下结论：

（1）3 种土壤调理剂都能使风沙土容重和 pH 减小，且均随着添加量的增加而越来越小；使风沙土孔隙度、有机质、全氮、全磷、速效磷及速效钾含量增大，且添加量越大，变化越明显；但全钾含量变化不大。同时改良处理后，棉花株高、基茎及生物量均明显优于对照处理，且随着添加量的增大而逐渐增大。

（2）改良效果综合评价结果表明，在相同土壤调理剂处理下，高灌水量处理的综合得分均大于低灌水量下，而高灌水量下综合得分基本呈现：生物炭处理 > 磷石膏处理 > 羧甲基纤维素钠处理的规律，其中 45 $g \cdot kg^{-1}$ 生物炭处理的综合得分最高，为 4.69，因此，在西北沙土中可以通过添加 45 $g \cdot kg^{-1}$ 的生物炭来改善风沙土理化性质，促进植物生长，从而加速荒漠区生态恢复及防风固沙。

（3）风沙土植物难以定存，一个很重要的原因是风沙土颗粒松散，养分含量少且保水保肥力差。因此，如果能通过调理剂改善土壤性质，不失为在西北地区的荒漠化防治研究中的一种新方法。不同于以往传统单一的土壤调理剂改良风沙土的研究，本文是通过建立土壤调理剂对土壤理化性质及植物生长状况的综合评价体系，可全面考虑各个评价指标的共同影响，为风蚀沙化区域的土壤改良和植被恢复提供客观、准确的评价标准。但本研究是进行异位取土的盆栽实验，而关于土壤调理剂在沙地实际环境中的改良效果还有待进一步研究。

参考文献(References)：

〔1〕 崔向慧，卢琦. 中国荒漠化防治标准化发展现状与展望〔J〕. 干旱区研究，2012，29(5)：913－919.〔Cui Xianghui，Lu Qi. Development status and prospect of standardized desertification combating in China〔J〕. Arid Zone Research，2012，29(5)：913－919.〕

〔2〕 沈亚楠，仇梦梦，岳耀杰. 中国北方土地沙漠化灾害危险性评价〔J〕. 干旱区研究，2017，34(1)：174－184.〔Sheng Yanan，Qiu Mengmeng，Yue Yaojie. Sandy desertification hazard assessment in North China〔J〕. Arid Zone Research，2017，34(1)：174－184.〕

〔3〕 韩丽文，李祝贺，单学平，等. 土地沙化与防沙治沙措施研究〔J〕. 水土保持研究，2005，12(5)：214－217.〔Han Liwen，Li Zhuhe，Shan Xueping，et al. Research on strategy for land desertification control〔J〕. Research of Soil and Water Conservation，2005，12(5)：214－217.〕

〔4〕 王涛. 荒漠化治理中生态系统、社会经济系统协调发展问题探析——以中国北方半干旱荒漠区沙漠化防治为例〔J〕. 生态学报，2016，36(22)：7 045－7 048.〔Wang Tao. Study on the coordinated development of ecosystem and socio-economic system in

desertification control: A case study of desertification control in semiarid area in North China[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(22):7 045 – 7 048.]

[5] 张媛媛,马成仓,韩磊,等.内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较[J].生态学报,2012,32(11):3 343 – 3 351.[Zhang Yuanyuan,Ma Chengcang,Han Lei,et al. Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant *Caragana* species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(11):3 343 – 3 351.]

[6] 蒋德明,曹成有,押田敏雄,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工林防风固沙及改良土壤效应研究[J].干旱区研究,2008,25(5):653 – 658.[Jiang Deming, Cao Chengyou, Toshio Oshida, et al. Study on the effect of protection against wind,sand-fixation soil improvement of *Caragana microphalla* plantations in Horqin sand land[J]. Arid Zone Research,2008,25(5):653 – 658.]

[7] Arthur E, Cornelis W, Razzaghi F. Compost amendment to sandy soil affects aoil properties and greenhouse tomato productivity[J]. Compost Science & Utilization,2012,20(4):215 – 221.

[8] 黄殿男,谭杰,傅金祥,等.城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果[J].水土保持学报,2017,31(1):323 – 327.[Huang Diannan,Tan Jie,Fu Jinxiang,et al. Amelioration effect of municipal sewage sludge on desertification soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(1):323 – 327.]

[9] Zhou L,Liu J H,Zhao B P,et al. Effects of soil amendment on soil characteristics and maize yield in Horqin Sandy Land [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016, 41(1):12 005.

[10] 武梦娟,王桂君,许振文,等.生物炭对沙化土壤理化性质及绿豆幼苗生长的影响[J].生物学杂志,2017,34(2):63 – 67.[Wu Mengjuan,Wang Guijun,Xu Zhengwen,et al. The impact of biochar on mung bean growth and soil physicochemical properties of sandy soil[J]. Journal of Biology,2017,34(2):63 – 67.]

[11] Mulcahy D N,Mulcahy D L,Dietz D. Biochar soil amendment increases tomato seedling resistance to drought in sandy soils[J]. Journal of Arid Environments,2013,88(1):222 – 225.

[12] 杨桐桐,封莉,张立秋.城市污泥堆肥产品施用对沙荒地土壤理化性质及高羊茅生长的影响[J].环境工程学报,2017,11(4):2 462 – 2 468.[Yang Tongtong, Feng Li, Zhang Liqiu. Effects of application of composted municipal sludge on physico-chemical properties of desert land soil and growth of tall fescue [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2017,11(4):2 462 – 2 468.]

[13] Cui Y B,Zhang W J,Zhao K,et al. Stabilized sludge fertilizer from sludge drying reed bed for sandy soil amendment[J]. Journal of Residuals Science & Technology,2017,14(3):1 – 8.

[14] 宗莉,杨效和,王爱勤.腐植酸复合材料对沙土理化性质和植物生长的影响[J].腐植酸,2015,2(2):15 – 19,32.[Zong Li, Yang Xiaohe,Wang Aiqin. Effect of humic acid composite materials on physic-chemical properties of sandy soil and plant growth [J]. Journal of Humic Acid,2015,2(2):15 – 19,32.]

[15] 宋明元,吕贻忠,李丽君,等.土壤综合改良措施对科尔沁风沙土保水保肥能力的影响[J].干旱区研究,2016,33(6):46 – 46.[Song Mingyuan, Lv Yizhong, Li Lijun, et al. Effects of comprehensive improvement measures on moisture and fertility conservation capacity of aeolian sandy soil[J]. Arid Zone Research, 2016,33(6):46 – 46.]

[16] Papafilippaki A,Paranychianakis N,Nikolaidis N P. Effects of soil type and municipal solid waste compost as soil amendment on Cichorium spinosum,(spiny chicory) growth[J]. Scientia Horticulturae,2015,195:195 – 205.

[17] 赵亮,唐泽军,刘芳.粉煤灰改良沙质土壤水分物理性质的室内试验[J].环境科学学报,2009,29(9):1 951 – 1 957.[Zhao Liang,Tang Zejun,Liu Fang. Laboratory tests of fly ash as a sandy soil amendment and its effects on soil water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2009,29(9):1 951 – 1 957.]

[18] 张宾宾,郭建斌,蒋坤云,等. Arkadolith 土壤改良剂对杨柴生长状况及沙土改良效果研究[J].水土保持通报,2011,31(4):190 – 194.[Zhang Binbin, Guo Jianbin, Jiang Kunyun, et al. Effects of Arkadolith soil modifier on sand soil's properties and growth of astragalus mongolicum[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(4):190 – 194.]

[19] Mi J Z,Liu J H,Xu S T,et al. Effects of sandy soil amendment on soil moisture and growth status of millet with rainfed sandy soil in a semi-arid region[J]. Advanced Materials Research,2015,1 092 – 1 093:1 234 – 1 242.

[20] 陶玲,曹田,吕莹,等.生物型凹凸棒基高分子固沙材料的复配效果[J].中国沙漠,2017,37(2):276 – 280.[Tao Ling,Cao Tian,Lv Ying,et al. Function of biological and sand-fixation polymer material based on attapulgite[J]. Journal of Desert Research, 2017,37(2):276 – 280.]

[21] 王雪,李菊梅,徐明岗,等.聚丙烯酰胺对沙土改土保肥的作用[J].生态环境学报,2008,17(5):2 086 – 2 089.[Wang Xue,Li Jumei,Xu Minggang,et al. Effect of polyacrylamide on improving sandy soil property[J]. Ecology and Environment,2008,17(5):2 086 – 2 089.]

[22] 许继飞,康振中,赵吉,等.煤基固废与牲畜粪便固态发酵基质改良沙土的研究[J].环境科学与技术,2017,40(7):160 – 166.[Xu Jifei,Kang Zhenzhong,Zhao Ji,et al. The amelioration of sandy soil using the solid fermentation mixture of the based-coal solid waste and the livestock excrement[J]. Environmental Science & Technology,2017,40(7):160 – 166.]

[23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.[Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd. Beijing:China Agricultural Press,2000.]

[24] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.[Shao Mingan, Wang Quanjiu, Huang Mingbin. Soil Physics[M]. Beijing:Higher Education Press,2006.]

[25] 武玉,徐刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J].地球科学进展,2014,29(1):68 – 79.[Wu Yu, Xu Gang, Lv Yingchun, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: Current status and knowledge gaps[J]. Advances in Earth Science,2014,29(1):68 – 79.]

[26] 夏安,邓跃全,董发勤,等.磷石膏基缓释氮肥的研究[J].非金属矿,2011,34(4):35 – 37,40.[Xia An, Deng Yuequan, Dong Faqin,et al. Study on phosphogypsum-based slow release nitrogen fertilizer[J]. Non-Metallic Mines,2011,34(4):35 – 37,40.]

[27] Wang X,Chen T,Ge Y,et al. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors[J]. Journal of Hazardous Materials,

2008,160(213):554－558.
〔28〕张微. 生物质土壤改良剂对风沙土改良效应及植物生长的影响〔D〕. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2014.〔Zhang Wei. The Influence of Biomass Soil Improver on Aeolian Sandy Soil Improvement Effect and Plant Growth〔D〕. Hohhot:Inner Mongolia Normal University,2014.〕

Improvement of Aeolian Sandy Soil by Soil Conditioner

XI Yin－qiao[1,2], ZHAO Ying[1], DONG Zheng－wu[1], LI Sheng－yu[1]

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*;
2. *University of Chinese Academy of sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: This study synthetically evaluated the effects of three kinds of soil conditioner (sodium carboxymethyl cellulose, phosphogypsum and biochar) on the physiochemical properties of Aeolian sandy soil and cotton plant growth. A pot experiment was carried out under different ratios of soil conditioner additions, and 12 indexes were determined. The methods of principal component analysis (PCA) and mathematical calculation of weighted summation were used to establish the comprehensive evaluation equation for the improvement effect by calculating the comprehensive score so as to select the best ratio of soil conditioner. The results showed that all three kinds of soil conditioner could be used to decrease the soil bulk density and pH value, increase thesoil porosity and contents of organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and available potassium, and slightly change the total potassium content. Moreover, the plant height, basal stem and biomass of cotton were increased substantially. Based on the comprehensive evaluation equation, the comprehensive score under high irrigation was significantly higher than that under low irrigation, and the comprehensive score was in an order of CG3 > CG2 > CG1 > BG3 > BG2 > AG3 > BG1 > AG2 > AG1. The improvement effect of applying biochar for 45 g · kg－1 under high irrigation was the best, and its score was the highest (4.69).

Key words: Aeolian sandy soil; soil conditioner; principal component analysis; pot experiment; cotton